基于仿真气球冒险任务(BART)的风险决策研究*

邓尧[1,2] 王梦梦[1,2] 饶恒毅[1,2]

([1]上海外国语大学国际工商管理学院，上海 201620)

([2]上海外国语大学脑与认知科学应用重点实验室，上海 201620)

摘要 仿真气球冒险任务(The Balloon Analog Risk Task, BART)能在实验室环境下模拟真实世界的风险情境，具有高生态性，稳定性和可靠性等优点，已经成为风险决策研究的中最常用的实验范式之一。近年来，研究者发展了多种 BART 变体范式，对发展、健康以及精神病理等多领域的风险决策行为及其神经基础开展了广泛探索。BART 任务中的风险决策加工与腹侧纹状体、前扣带皮层、脑岛、中脑及背外侧前额叶等脑区的激活相关。未来研究需要进一步完善 BART 任务在风险决策认知神经领域的信效度并扩展 BART 的应用情境。

关键词 仿真气球冒险任务(BART)，风险决策，认知神经机制

1 引言

风险是指在可获得一定收益的同时，伴随损害或者危险发生可能性的一种决策情境(Leigh, 1999)。人们在日常生活和工作中经常不可避免地需要在有风险的情境下做出选择和决策。例如，人们常常要选择是把自己的工作收入存银行还是买股票投资，是做手术切除肿瘤还是通过药物治疗肿瘤。这些情境都需要决策者权衡每种选择相应的风险和收益。风险和收益的不确定性既可能给决策者带来一些负面后果，也可能是新机遇的开端。探索和理解人在各种风险情境下如何进行有效决策及其背后的认知神经机制，是近年来心理学，经济学，金融学，管理学等多学科决策研究的热点。

为了帮助人们更好地在风险决策中占据优势，避免或减缓潜在的负面后果，研究者们试图运用不同的测量方法(从自陈量表到一系列风险决策任务)，从不同角度(群体层面以及个体差异层面)对风险决策行为展开探索(Slovic, 1964)。然而过去的评估方式主要采用的自陈量表存在以下几个问题：①测量角度不够全面，可能受到潜变量的影响。②被试在填写自陈量表时可能存在社会赞许性偏差，无法反映其真实的风险倾向。③无法动态测量风险行为，与真实的决策情境存在一定的差异，且易受记忆偏差的影响，也无法预测未来的风险行为

收稿日期：2021-06-02

* 本研究受上海高校特聘教授（东方学者）岗位计划项目（TP2016020）和上海外国语大学校级重大科研项目(20171140020)，以及国家自然科学基金重点项目(71942003)资助。

通信作者：饶恒毅，E-mail: hengyi@gmail.com

(Lejuez et al., 2002)。针对自陈量表存在的缺陷，研究者们设计了一系列风险决策行为研究范式，例如爱荷华赌博任务(Iowa Gambling Task, IGT) (Bechara et al., 1994)；剑桥赌博任务(Cambridge Gamble Task, CGT) (Rogers et al., 1999)。但这些范式与自陈量表的研究结果生态性不高，与真实世界的风险决策行为仍存在较大的差异。

为了弥补上述研究范式及自陈量表存在的缺陷，并实现在实验室环境下对现实世界风险行为的真实模拟，Lejuez 等人于 2002 年设计了仿真气球冒险任务(The Balloon Analog Risk Task, BART)。他们利用计算机在实验室环境下模拟真实世界的风险情境，实现对被试风险决策偏好的判定与预测。相比于其他风险决策任务，该任务以更能模拟真实风险情境的气球为材料，在保证实验环境能最大化融合现实世界风险情境的前提下，显著减少测量过程中个体主观意愿引起的测量偏差，更加有效地测量真实的风险行为。正因此该任务被越来越多的研究者所采用。在这项任务中，被试通过点击屏幕中央的气球进行操作，每一次吹气都将使气球膨胀并增加破裂的风险，但得到的奖赏也会相应增加。若在吹气过程中气球破裂，被试将会受到一定的惩罚，即损失部分已积累的奖赏。在任务过程中，被试要持续不断地在吹气可能带来的奖励以及潜在的气球破裂惩罚之间进行权衡，因此可以通过被试是否吹气以及吹气次数的多少来测量个体的风险偏好。

为了有效模拟真实世界不同程度的风险，BART 任务原始实验中设置了不同的平均气球爆破点，更大的气球爆破点也意味着每个试次中可能允许的吹气次数上限增加，可以帮助捕捉到更多在风险决策中的个体差异。在任务中随着气球的膨胀，被试所承担的风险也不断增加，反映了现实生活中风险的瞬息变化。

BART 任务是目前风险决策的主流实验范式之一，不仅被用于测量单独的风险决策行为，还为满足各类研究情境的需要而形成不同的变体。BART 任务目前也与各种神经层面的新技术结合，帮助从认知神经层面对风险决策行为有更好的认识。本文对 BART 任务的演变过程进行总结，对比得出 BART 任务相比于现存其他研究范式的优势所在，梳理 BART 任务在行为以及神经层面的研究进展，并对未来研究中如何能够更好地发挥 BART 任务的优势进行展望。

2 BART 任务的演变

在 BART 任务的发展中，研究者们对任务进行了不同程度以及形式上的改变，满足了各类研究的需要。例如，BART 任务在对“金钱”奖赏、风险与决策行为之间的关系进行探

究时，除了原始的“气球膨胀-奖赏增加-风险增加”的模式外，还通过设置更多的奖赏梯度来研究风险以及奖赏的多少共同对决策的影响(Hüpen et al., 2019)。同时也有研究者设置了真实以及虚假金钱奖励的情境，探究奖赏虚实对风险决策行为的影响(Xu et al., 2018; 徐四华等， 2013)。奖赏是在风险决策中促使人们寻求风险的重要因素，也是风险决策研究中一个重点关注的内容，BART 任务能够帮助研究者对奖赏情境进行灵活的操控，从而更加全面以及深入地研究其对风险决策的影响。

除了满足不同研究情境的需要外，BART 任务也被改编以适用于不同被试群体的需要。例如，在青少年风险行为测量中，考虑到金钱作为奖赏的不适应性，研究者设计了面向青少年群体的 BART-Y 变体。该任务中使用分值代替金钱计数，并将最终得分进一步分为三个区间，不同得分区间可获得不同的实物奖励(Lejuez et al., 2007)。同时 BART 任务也被延伸到动物风险行为的研究中。例如，Jentsch 等人(2010)为了研究啮齿类动物的风险行为及其相应的神经机制，对 BART 任务进行了改编。为了模拟 BART 任务中的选择过程，增加了 add 杆和 cash-out 杆以供大鼠选择。结果发现大鼠的行为表现与人类被试的行为非常相似，并且也发现在风险决策中与人类类似的脑区——内侧前额叶(medial prefrontal cortex, mPFC)的激活。这为未来跨物种的研究提供了方向，拓展了风险决策研究中被试选择的范围。

随着社会发展，一系列新的风险情境不断涌现，而 BART 任务也在“与时俱进”。例如，近年来与股票市场相关的连续风险决策受到一定的关注，BART 任务也被改编用于连续风险决策的测量。每一个气球的爆破率被定义为 50%，被试只需要在吹气与不吹气之间进行选择。如果吹气且未爆破，被试将获得一定的奖励；如果失败将显示爆破的图案。该变体考察了被试在连续决策中的风险偏好，并且更能满足与脑电技术结合使用的需要(Pleskac et al., 2008; Wallsten et al., 2005)。也有研究者发现过去的 BART 任务中并没有考虑现实中风险管理的内容，因此在 BART 任务的基础上开发了一种用于评估保护性风险管理的任务 BAIT(The Balloon Analog Insurance Task)任务。该任务在 BART 任务的基础上增设了可购买保险的条件，对个体愿意支付多少金额来保护已拥有的“财产”进行评估(Essex et al., 2011)。

上述是目前相关领域依据研究需要对 BART 任务的改编，正是这些研究变体的产生，使得 BART 任务的应用范围不断扩大，研究的有效性和生态性进一步增强。

3 BART 任务的信效度及其优势

2002 年 Lejuez 等人在设计 BART 任务的同时，也对 BART 任务的可靠性进行了检验。

结果发现 BART 任务与冲动性、物质滥用、赌博行为以及危险性行为等风险有关变量之间存在显著的相关性(r= 0.20~0.44)。同时，BART 任务也被证实可以帮助预测个体未来的风险行为，如犯罪以及物质滥用(R^2= 0.29~0.40)。BART 任务的有效性也在后续各类研究中得到了更进一步的证实。例如，在对不同程度精神病群体的风险决策进行研究时，BART 任务的结果与患者风险决策行为有关的心理报告一致(Hunt et al., 2005)。同时 BART-Y 任务也可以有效地预测未来风险行为的可能(R^2= 0.322)(Lejuez et al., 2007)。还有研究通过设计三组不同的平均气球爆破点，证明了 BART 任务在不同风险情境下的组间相关性良好(r = 0.66~0.78)(White et al., 2008)。

重测信度是实验范式稳定性及一致性的重要体现。Xu, Korczykowski 等人(2013)验证了 BART 任务在两周间的重测信度良好(r = 0.66~0.76)。Weafer 等人(2013)采用 119 位成年人的大样本数据检测了在平均 8.6 天的间隔前后，BART 任务的重测信度良好(r = 0.79)。在青少年有关的 BART-Y 任务中，通过进行每日三次的任务测量，发现 BART-Y 测量结果之间的相关性显著(r = 0.62~0.82)，重测信度良好。同时，考虑到目前 BART 任务在认知神经层面的运用，近年来也有研究针对 BART 任务与神经层面技术结合的信效度进行检验，例如相关研究测量了BART任务与fMRI共同使用时的组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)，结果证明了 BART 任务在行为测量上的可靠性(ICC > 0.79)以及任务态时脑区激活的稳定性以及可靠性(ICC = 0.53~0.62)(Li, Pan et al., 2020)。其中不同脑区的重测信度各不相同，如有研究发现顶叶、枕叶、颞叶区域的可靠性较高，决策期的前岛叶以及结果反馈期的右尾叶在 BART 任务重测信度研究中的 ICC 高达 0.54 以及 0.63。这些重测可靠性较高的激活脑区还表现出较高的家族遗传性(Korucuoglu et al., 2020)。总体而言，BART 任务及其变体都被证明在不同的实验情境以及时间间隔条件下具有良好的重测信度，并且在与神经层面技术结合时的稳定性也得到了较好的证实。虽然目前也有研究表明，相比于 BIS 等量表的重测信度而言(r=0.6~0.8)，BART 任务在六个月间隔条件下的重测信度相对较低(r=0.4~0.6)，但这并不意味着像 BART 任务一样的行为测量方法就失去了其在测量上的优势。实际上，有研究者发现行为测量手段会导致更复杂的认知过程、触发不同的风险偏好以及决策模式。因此，在探究风险决策中的个体差异以及特定风险条件(描述性或经验性)下的决策行为时具有重要的价值(Frey et al., 2017)。

长期以来，BART 任务都被认为是个体风险倾向的重要测量工具，并辅助用于其他风险决策范式的研究中，作为风险倾向测量结果的重要参照(e.g. Upton et al., 2011; Giustiniani et al., 2019)。这意味着 BART 任务具有同其他范式以及量表相比的测量优势以及独特之处，在

不同的研究结果中也得以证实。BART 任务可以有效地解释个体在风险相关自陈量表中测量结果的差异，而 BART 测量结果呈现出的差异比量表测试更为显著(Aklin et al., 2005)。在成瘾有关的研究中，BART 任务也表现出独特的测量优势(Canning et al., 2021)。例如一项研究在同时使用 BART 任务、自陈量表(BIS 量表)、反应抑制任务(a Go/No-Go task & a Stop signal task)以及延迟折扣程序对酒精成瘾进行测量时，发现 BART 任务能够更有效地区分青年个体在酒精摄取上的差异，并预测个体的酒精摄取情况以及是否存在酗酒问题(Fernie et al., 2010)。Lejuez, Aklin, Jones 等人(2003)比较了吸烟者与不吸烟者之间的风险行为。对比研究发现，BART 任务相对于行为问卷或者赌博任务(如 BGT 任务，Bechara Gambling Task)而言，能够更准确有效地区分吸烟行为，反映了 BART 任务在区分不良行为上更加可靠。此外在 BART 任务与 BGT 任务对比中还发现，相比于 BGT 任务，BART 任务的得分与饮酒和药物滥用有关自陈量表的结果相关性更显著(BGT: $p>0.05$; BART: $p<0.05$)，证明在相关研究中 BART 任务能发挥更好的预测效力(Skeel et al., 2007)。与 IGT 任务的对比研究发现，BART 任务在测量个体冲动性行为的差异上更加稳定可靠，重测信度也更加良好(ICC of BART: r = 0.66~0.76; ICC of IGT: r = 0.53~0.67) (Xu, Korczykowski et al., 2013)；同时由于 IGT 任务受到学习效应(learning effect)的影响，研究表明其需要大量的预实验才能保证被试掌握具体实验规则；而 BART 任务则能够让被试在更短时间内掌握规则并进行正确操作，相比而言更加省时。尤其是对于一些任务时间较长的实验(如涉及 fMRI 以及 ERP 等实验流程)，BART 任务能够在被试表现不受影响的前提下缩短实验时间 (Buelow & Blaine, 2015)。BART 任务相比于 CCT(Columbia Card Task)而言，在多次测量中的组间变异系数较小，结果更加稳定，重测信度高；在与 LOT(Adaptive lotteries)、MT(Marbles task)等其他行为层面的风险决策任务对比中也展现出重测信度以及测量结果可靠性上的优势(Frey et al., 2017)。

总体而言，相比于其他一些风险决策范式而言，BART 任务在重测信度以及稳定性上都具有一定的优势；BART 任务操作相对比较简易，能够让被试快速掌握实验流程，对一些需要长时间进行的实验而言，该任务更加适合作为风险决策的辅助测量工具，如 BART 任务能够满足 ERP 及 fMRI 等技术在实验条件以及时间上的需要，与这些神经技术结合使用的信效度目前也得到了有效地证实。

4 BART 范式的研究现状

4.1 基于 BART 范式的风险决策行为研究

4.1.1 年龄研究中的应用

年龄与风险行为之间的关系一直以来都备受关注，青少年以及老年人是其中具有一定代表性的研究群体。而 BART 任务也被用于不同年龄段风险行为的研究和对比中。BART 任务是首个从行为学角度对青少年风险决策进行测量的范式(Lejuez, Aklin, Zvolensky et al., 2003)，已有研究也证实了其在测量各类青少年风险行为上的有效性。例如，BART 任务结果与青少年成瘾、违法行为、冲动性行为以及安全行为等之间显著相关，在青少年风险决策研究中被频繁使用。相对而言，其允许测量的青少年风险决策类型比其他范式更加全面(例如 BGT 任务无法测量青少年饮酒行为)，一系列测量结果确定了青少年风险决策中重要的组成要素(如：期望值(expected value))，相比于其他范式更加有趣并且能够使青少年被试更快地学习掌握(如 IGT 任务的可靠性需要基于学习效果)，因此在青少年风险决策行为测量中具有一定的优势。

对于青少年而言，风险行为主要包括成瘾(可卡因、吸烟、饮酒)、违法行为(盗窃)、冲动性行为(赌博)以及不安全行为(如不系安全带)等等。青少年的风险行为更容易受到周围人以及环境的影响，且带来的后果深远，因此受到了很多研究者的关注。以 BART 任务作为测量范式，研究者们对青少年风险决策行为有了进一步的发现与认识。例如，有研究发现父母的风险行为会影响青少年的风险倾向(Banducci et al., 2015)。此外，同龄人也会对青少年风险行为造成影响，在同样的风险情境下，如果有同龄同伴在场且收获正反馈的青少年会在下一轮任务中反而变得更加谨慎(Kessler et al., 2017)。

在行为研究的基础上，还有研究继续深入到基因以及遗传层面，尤其关注年龄变化与风险决策之间的关联。Anokhin 等人(2009)以双胞胎群体作为样本，利用 BART 任务发现青少年风险行为个体差异受到了遗传因素的影响，但是该影响依赖于年龄与性别。而有关于风险行为发展变化的研究发现，随着年龄增长，个体的风险行为会先呈现增长趋势后下降，且在青春期晚期以及成年早期达到顶峰(Duell, 2018)。除青少年群体外，BART 任务在老年群体风险决策研究中也被广泛应用。例如，Deakin 在 2004 年的研究中发现衰老会造成个体在决策中思考时间更长、表现更差以及风险行为减少。Cavanagh 等人(2012)发现年长者的风险行为更多是由奖赏驱使的；尤其是在高风险的情境下，年长者会对 BART 任务中奖赏的增加更为敏感。

4.1.2 性别研究中的应用

性别与风险决策的关系是风险行为研究中的另一个关注点。借助 BART 任务，研究者也对性别与风险决策的关系有了进一步认识。例如，在风险投资中，男性比女性的风险倾向

更大；男性对于酗酒的依赖性更高(Hill & Chow, 2002)；男性也更加容易因为暴力意外而死亡。Karakowsky 和 Elangovan (2001)研究发现男性相比女性更能忍受风险，男性更强大的风险承受能力使他们愿意在相同情境下冒更大的风险。

Lighthall 等人(2009)借助 BART 任务发现风险行为表现出明显的性别差异，男性普遍比女性更加倾向于冒险，这与已有的一些研究结果一致。同时研究还发现这种差异会在压力存在的情况下增加。Li 等人(2016)发现在年轻群体的风险行为存在明显的性别差异，具体表现为男性比女性更加冒险，对应了神经层面上前额叶皮质(prefrontal cortex; PFC)的激活差异，但这种差异在老年人群中并不明显。性别与生物学上的基因以及激素关系密切，相关研究还借助 BART 任务，从基因以及激素的角度着手，对性别导致的风险决策行为差异及相关风险精神病理背后的机制提供解释。例如，生物学相关的研究借助连续决策情境下的 BART 任务发现，男性分泌的睾酮会影响单胺氧化酶(MAOA)多态性群体的风险行为，MAOA 多态性是规避风险有关的易感因素，通过改变这个影响因素会造成该类男性群体风险行为的增加(Wagels et al., 2017)。此外，睾丸激素与皮质醇也会对风险行为产生影响，而睾丸激素主要对男性产生影响。借助 BART 任务测量，研究发现两种激素会共同作用并影响个体的风险行为，且在皮质醇水平较低的前提下，睾丸激素与风险寻求之间存在正相关关系，但是在皮质醇水平较高的个体中则不存在这样的关系(Mehta et al., 2015)。遗传学相关研究利用 BART 任务发现，遗传因素对于风险行为的影响具有明显的性别差异。Anokhin 在 2009 年发现在 12 岁时性别对于风险行为的影响有适度遗传，到 14 岁时男性受到遗传因素的影响继续增强，达到了 55%，而女性反而不受明显影响。该研究为探索遗传因素对风险决策的影响奠定了基石。BART 任务还被用于疾病研究中的性别差异比较，如 Hunt 等人(2005)发现即使是针对精神病患者而言，男性患者仍然表现出比女性患者更具风险的行为。

利用 BART 任务进行的风险行为与性别差异的相关研究一致发现，男性个体相比女性个体更加风险寻求，且男性的风险行为受激素以及遗传的影响更大，也更容易产生不健康的风险决策行为。BART 任务在各研究中测量结果的一致性反映出其在测量性别导致的风险决策行为差异上具有一定的稳定性与可靠性，且该任务可与多个范式配合使用，多角度对性别相关的风险决策进行测量。目前性别差异的研究也从行为层面向遗传基因以及神经层面不断深入，BART 任务在与神经层面技术结合使用上具有优势，未来在性别相关风险决策的深入研究中，BART 任务将发挥更大的价值。

4.1.3 精神病理学及健康领域研究中的应用

在与风险有关的精神病理学研究中，BART 任务也发挥了重要作用。如前文提到，BART

任务的测量结果与自陈量表的结果之间相关性显著，其中包含了一系列精神病理相关风险行为的测量。因此，成瘾、焦虑、健康以及睡眠等有关研究中都有使用 BART 任务作为测量范式并获得了一定的进展与成果，展现出 BART 任务在风险相关研究中的优势。

就成瘾有关研究而言，Lejuez, Aklin, Jones 等人(2003)利用 BART 任务比较了吸烟者与不吸烟者之间的风险行为，发现该任务能够准确有效地区分吸烟与不吸烟者的行为。利用 BART 任务发现，赌博成瘾与个体对该行为的注意力偏差有关，成瘾者会对于赌博刺激更加敏感并且愿意在赌博中冒更大的风险。且对长期赌博成瘾患者来说，这种情况可能在年轻时期就已经形成(Ciccarelli et al., 2020)。BART 任务作为测量工具也被用于探究焦虑症与风险之间的关系。患有焦虑症的被试会比健康被试更容易产生对风险行为的知觉偏差，从而高估实际的风险，并且做出较高的风险规避性行为(Kim et al., 2020)。

相关研究也借助 BART 任务从基因以及遗传层面展开。例如，有研究者通过 BART 任务从行为的角度证明了 5-HTTLPR 基因的功能多态性对个体风险决策的影响。该基因的 s-携带者会表现出更强的风险厌恶以及在财务决策框架方面更高的敏感性，结果反映了风险决策行为会受到部分基因遗传以及变异的重大影响(Crişan et al., 2009)。此外，一些通过健康被试展开的研究，也为风险行为在基因层面的深入探索以及发展提供启示。BART 任务的数据在一些研究中被作为人格以及风险决策有关基因特征的反映，帮助更好地预测与理解风险行为。这侧面论证了 BART 任务用于基因层面研究的可行性，为其在精神病理学相关研究中的运用提供参考。例如有一项研究通过 BART 任务与 QDT(Quantum Decision Theory)(一项基于量子力学的决策预测理论)结合，在通过 BART 任务获得与遗传以及人格有关的数据结果后，再基于 QDT 进一步对其赋予权重并量化处理，更有效地从理性以及非理性决策两个角度对风险决策中个体复杂的决策行为进行预测解释 (Weidlich, 2020)。研究表明了风险决策有关基因以及人格特征是预测风险行为的重要指标。

睡眠与风险决策的关系也在近年来备受关注，一些国内研究者对睡眠剥夺导致的风险决策意愿变化以及风险行为增加做出了阐述(刘晓婷 等, 2019)；同时还有研究发现框架效应对风险决策的影响也受到个体睡眠质量的调节，随着睡眠质量的下降，风险决策中的框架效应逐渐减弱(Xu et al., 2021)。这些研究结果都反映出睡眠与风险决策间存在的密切关系，具有重要的研究意义与价值。除以上提及的研究成果外，借助 BART 任务，研究者还发现睡眠不足会对于个体的判断以及冲动控制产生影响。而咖啡因会减缓睡眠不足对风险决策的影响，表明睡眠不足者选择摄入咖啡因产品对其决策行为来说实际并不是一件坏事(Killgore et al., 2011)。

此外 BART 任务还被运用于冲动性、肥胖以及激素等与个体健康有关领域的研究中，帮助对相关群体的风险决策变化及健康对风险决策的影响进行探索。在冲动性有关研究中发现，冲动对风险决策并不是完全有害的，不同程度的风险情境会激发个体产生不同程度的冲动，帮助指导个体正确的决策行为(Hüpen et al., 2019)。通过 BART 任务测量还发现高压力以及高风险行为两者的共同作用会导致肥胖等负面影响(Mason et al., 2018)。还有研究发现应激性刺激源会造成个体风险行为的产生，而大脑中的盐皮质激素受体(MR)是其中主要的影响因素，急性的 MR 刺激会造成个体更多的风险寻求行为(Deuter et al., 2017)。

BART 任务作为风险决策的衡量指标，在对比患者与正常人的风险行为差异中发挥了重要作用，在健康发展相关研究中也有广泛应用。结合以上研究结果可以发现，无论是成瘾、高压力还是睡眠不足的群体都较正常人有相对更高的风险寻求行为；而焦虑症患者则会表现出更多的风险规避性行为。在酒精成瘾以及药物滥用等精神病理学风险决策研究中，BART 任务表现出了测量优势。

4.1.4 其他决策情境中的应用

除以上几个主要的应用情境外，该任务在很多不同的风险决策研究情境中都有所使用；探究了各类决策情境、决策时间以及决策模式对风险决策行为的影响，反映出 BART 任务在测量广度上的明显优势。例如，有研究者探究了竞争以及合作环境对于风险决策的影响，发现无论是在竞争还是合作情境下，个体都会愿意比单独决策时承担更多的风险，且男性受到这种情境的影响程度比女性更大(Liu et al., 2021)。Li, Mai 等人(2020)借助 BART 任务证明了决策的时间也会对风险决策结果造成影响，个体一般在下午进行决策时会比上午表现出更多的风险寻求，并且对于损失负反馈的敏感性降低，抑制控制的能力也会下降。同时 BART 任务还出现在各类风险决策模式以及情境的对比研究中。例如，连续风险决策研究(Zhang & Gu, 2018)，真实以及虚假金钱奖励下的风险决策对比研究(Xu et al., 2018; Xu, Xiao et al., 2019)等等。这些研究在原范式基础上进行了一定的改编以适应研究情境的需要，从各个角度证明 BART 任务能够适应多种决策情境的测量需求，灵活性非常高。BART 通常还会与一些神经层面的测量技术(如 ERP、fMRI、fNIRs 等)相结合使用，相关研究内容将在下一节进行阐述。

4.1.5 BART 范式的数据建模

BART 任务在行为数据建模上也有一定的发展，通过计算机建模能够深入探索决策研究范式的内在认知过程，有助于范式的进一步理解与优化。就 BART 任务而言，目前在建模方面已有一定的研究成果。例如 Wallesten 等人(2005)提出了系列模型对 BART 任务中个体

的行为进行解释。其中包含基线模型(baseline model)、目标模型(target model)以及学习评估模型(learning and evaluation model)三类。基线模型仅对任务过程建模，不涉及任何学习以及评估的过程；目标模型则主要针对任务中的学习过程建模；而学习评估模型则进一步考虑了学习以及评估两个过程，这部分模型包含有 8 个子模型。子模型依照前景理论认为决策者会在试次之间更新其对爆炸概率的判断。基于对气球爆炸概率的不同观点，子模型又分为静态过程子模型(stationary process submodel) (认为每次吹气爆炸的可能性恒定)以及非静态过程子模型(nonstationary process model) (认为吹气爆炸的可能性随吹气次数的增加而增加)两大类。

实际上，人们无法完全地理解决策的过程，这些不同的模型主要源于研究决策时不同的假设。一些假设认为决策存在“惯性”，决策者会选择无视反馈；一些假设则认为在每次决策时决策者都会有不同的状态并产生不同的决策行为，即符合非静态过程子模型所述的情况。而这些假设带来的参数引入以及基于数据的参数估计情况对模型优劣的评判和最优模型选择非常关键。考虑到过多参数的引入将导致模型过拟合情况的出现，因此研究者缩小到静态过程子模型中筛选并经过评估后选择了模型三作为最优模型。该模型包含 $\gamma+$(风险), β(反应一致性), $a0$ 以及 $m0$(先验爆炸分布相关自由参)四个参数，在后续一些研究中又被称为四参数模型(four-parameter model)。其中，后两个参数反应了被试对爆炸概率的认识以及对试次结果的学习情况。该模型认为被试会在气球间对最优打气次数进行更新，而不是在每次打气之间都进行学习，这是因为单次打气的更新会造成参数估计时输入信息不足，存在计算上的困难。该模型反映出在 BART 任务中影响被试风险倾向的主要因素是对结果的评估。在任务中，被试会首先根据已有经验数据设定吹气目标，再依据目标选择继续吹气或是停止；由于 BART 任务中风险的不确定性，被试将通过反馈数据不断更新对任务中风险的看法以及对气球爆炸概率的估计，这也是学习过程在 BART 任务中的重要作用。

后续有关 BART 任务建模的研究也主要在 Wallesten 等人(2005)的基础上展开。例如，Pleskac(2008)将 BART 任务作为连续风险决策任务的一种典例，并以模型三为基础对此类任务中的决策以及学习过程进行探索。该研究中，模型三被称为 BSR 模型(Bayesian Sequential Risk-Taking Model)，借助该模型以及 ART 任务(The Angling Risk Tasks)进一步发现风险信息不确定条件下学习过程有关的参数与自陈量表中风险有关结果之间的相关性不显著。研究反映出风险不确定条件下的学习过程会干扰任务过程中的风险识别，被试若依照负面结果进行风险概率的更新，可能会使其对风险环境有错误的认识而影响后续的决策行为。被试在任务中无法获得确切的爆破点信息以指导他们正确的收益最大化决策，这将导致 BART 任务在

测量风险倾向时的可靠性下降；而决策过程的正负反馈则可以改变被试对爆炸概率的估计并促进对概率的识别，该研究为后续 BART 任务建模的优化提供了方向。考虑到学习过程对模型的影响并为了达到模型更好的参数恢复(parameter recovery)，2011 年 van Ravenzwaaij 等人提出了两参数模型(two-parameter model)，删去了与学习过程有关的变量，仅包含 γ+以及 β 两个参数，同时对参与者人数以及试次数进行合理的限制。相比于四参数模型，二参数模型的提出能够更好地实现参数恢复以及同等数据条件下的模型拟合最优化。

二参数模型在四参数模型基础上进行了一定的改善，然而有研究认为该模型仍然存在局限性。二参数模型的重要前提是被试在 BART 任务中不进行学习，但这显然与现实不符。学习过程虽然可能对任务结果造成影响，但有助于被试对任务风险进行理解并做出相应的反应。BART 任务的优势之一源于模拟现实世界风险的真实性，而大部分现实生活的决策情境都涉及学习的过程，因此简单地去除学习有关变量可能会影响任务模拟的真实性。因此，近年来也有研究者对此模型再次进行优化。例如，Park 等人(2021)提出了 EWMV 模型(Exponential-weight Mean–variance Model)，在不删去学习有关参数的前提下改善了原有模型的参数恢复。通过对原有学习过程相关的两个参数进行重新参数化，降低两参数之间的高度相关性并改善参数恢复的结果。此外，该模型还展现出在被试风险行为以及风险偏好上的良好预测性，能够对不同程度的风险人群进行有效区分。另一项研究则进一步强调了学习过程的重要性，在原有模型的基础上引入了额外的学习敏感性参数并提出了 STL 模型(Scaled Target Learning Model)。该模型依照前一试次成功或是失败后被试的不同表现引入了 *vwin* 以及 *vloss* 两个参数，它们记录了任务中被试的行为变化并反映了其中的学习过程；同时，模型还考虑了实验设计对结果的影响，引入一个设计参数 *nmax*，有利于不同爆破点情境下的数据比较。目前，该模型已被证明在衡量风险倾向以及连续风险决策任务中学习速率两方面的有效性，对 BART 任务建模的发展有重要贡献(Zhou et al., 2021)。

4.2 基于 BART 范式的风险决策脑机制研究

4.2.1 电生理研究

作为具有高生态性并且操作简易的决策研究范式，BART 任务已经被广泛用于多种电生理学的风险决策研究。其中，BART 任务涉及的正反馈(奖励)以及负反馈(损失)，都会引起大脑中奖赏有关脑区的显著激活并被一些电生理学设备所捕捉，帮助研究者从认知神经层面进一步理解风险决策的内在机制。本节将主要探讨其中运用较为广泛的事件相关电位技术(event related potentials, ERPs)。

与行为学层面的研究类似，青少年群体也在BART任务有关的电生理研究中备受关注。Kessler等人(2017)发现相比于独立完成BART任务，同伴在场且获得正反馈(未出现气球爆破)的情境下，青少年被试会表现得更加谨慎且没有记录到反馈负波(feedback-related negativity, FRN)的增强，而获得负反馈(出现气球爆破)时则会观测到FRN的加强。即同伴对于青少年的风险决策影响视情况而定，在受到正反馈时，同伴在场会使下一轮青少年更加谨慎；而在受到负反馈时，同伴在场与独立实验情境下的测量结果差异不大。国内也有研究者探究了同伴在场以及自尊心这两个因素对于青少年风险决策的影响，发现了同伴在场会造成N1，P3以及LPP的幅度增加，且自尊心强的青少年表现出在P3以及LPP幅度上更大程度的增加。同伴在场或是自尊心强的青少年都会表现出更多的冒险行为，且自尊心强的青少年将更受同伴在场的影响(田录梅 等, 2017)。

风险决策中奖励的类型也受到了一定的关注，通过BART任务发现真实与虚假金钱奖励对风险决策行为会产生一定的影响。在真实金钱奖励的情境之下，被试受负反馈后会倾向于在下一轮中更加规避风险。在脑电信号上，金钱奖励的数量越多，大脑中FRN信号越强；而在虚假金钱奖励情境中，并未观察到因金钱数量多少而产生的FRN的差异。证明真实与虚假金钱这两种激励机制在调节个体风险决策的效力上有所不同(Xu et al., 2018; Xu, Fang et al., 2013)。而在奖赏金额上，有研究发现随着积累奖赏金额的增加以及风险程度的增加，记录到P1以及P3振幅的减少以及P1潜伏期的增加，反映出被试在任务中的选择性注意力以及动机发生变化，即冒险次数明显减少且在每次决策中所需的时间明显增加，在决策中显得更加谨慎(Gu et al., 2018)。还有国内研究者探究了不同职业以及工作环境对风险行为的影响。例如，有研究者发现日常有更多冒险行为的驾驶员在BART任务中FRN振幅较低，P300成分减少，表明其风险寻求行为主要是以奖励刺激作为导向的(Ba et al., 2016)。

ERP技术与BART任务还被运用于疾病以及健康安全有关研究中。Sehrig等人(2019)比较了AUD患者(酒精使用障碍)与正常被试在BART任务时的差异，发现患者的决策任务时间普遍长于正常被试，并且患者在实验中记录到决策阶段P3信号更强，FRN更弱。在风险决策中患者则会表现出更多的高风险寻求行为而漠视负反馈，证明决策阶段的P3脑电信号差异与被试在风险决策中的高冲动性相关。同时另一项与安全有关的风险决策研究发现，戴安全帽的被试会比不带安全帽的被试在任务中增加冒险的可能，并且ERP检测到戴安全帽的被试组更低的中线θ波功率，证明戴安全帽会降低个体对于风险的认知控制能力，并且造成更多的风险寻求性行为(Schmidt et al., 2019)。还有研究者通过BART任务与ERP技术结合，探究了个体高层次的感觉寻求(HSS)与危险性行为之间的关系，结果表明高层次感觉

寻求被试对负面结果不敏感，导致个体会在面临潜在损失时仍然选择做出风险寻求行为(Xu, Luo et al., 2019)。

综上所述，BART 任务在电生理学层面的研究范畴与行为学层面有一定的交叉，在年龄及疾病健康等有关领域中较为常见。在任务中主要观察到的 ERP 成分包括 FRN, P3, P300, N1 以及 LPP 等。其中 FRN 成分频繁出现，反映出 BART 任务涉及多次决策后的反馈加工和学习过程。不同的奖励类型、环境、健康变化以及个体本身的风险倾向差异都将对风险决策中的行为表现以及记录到的 ERP 成分数据产生影响。

其他电生理相关的研究还包括结合使用经颅直流电刺激技术(transcranial direct current stimulation, tDCS)，验证了 DLPFC 脑区及 θ 波段振荡活动情况对风险情境中适应性决策的重要性。风险决策时左、右侧前额叶的 θ 波段振荡的平衡对个体决策起到关键性作用(Sela et al., 2012)。该方式还可用于异常风险决策行为的干预或治疗。例如，有研究者发现用 tDCS 对左侧的 DLPFC 给予单侧阴极 HD-tDCS 刺激可以降低被试在 BART 任务中的风险行为，表明左侧的 DLPFC 脑区对风险决策有重要影响。为临床冲动性有关的治疗提供思路(Guo et al., 2018)。还有研究者通过 tDCS 调节 DLPFC 以及 OFC 的活性，发现 OFC 主要影响未知风险概率的决策任务，而 DLPFC 的活性则多影响已知风险概率的决策任务(Yang et al., 2017)。

4.2.2 神经成像研究

BART 任务与 fMRI(functional magnetic resonance imaging, fMRI)技术的结合使用，也使研究者在风险决策的认知神经层面上迈出了一大步。Rao 等人(2008)开创性地将 fMRI 技术与 BART 任务结合使用，在研究中验证了 BART 任务被用于 fMRI 技术中作为大脑风险决策评估方式的实用性。同时在该研究中还探究了主动以及被动风险决策行为有关的神经机制。研究发现，主动选择的风险行为会造成中脑边缘系统-前额叶环路(mesolimbic-frontal pathway)以及视觉通路区域的激活，但在被动风险决策中并没有观察到相关的激活情况。研究还发现决策与右侧 DLPFC 的神经活动具有密切的关联，该结论也与电生理学中的结果一致。

如前文所述，BART 任务被认为是在行为学上测量个体风险倾向的重要范式，而其背后的神经基础也引起了诸多研究者的兴趣，甚至有研究者采用跨物种的被试对其背后的机制进行探索。例如，Jentsch 等人(2010)通过 BART 任务与 fMRI 技术结合，探究个体高风险倾向的神经基础。通过改编 BART 任务，对大鼠神经失活前后脑区的激活情况进行对比，发现无论是否存在风险，眶额叶皮质(orbitofrontal cortex, OFC)都会在奖赏增加时被更大程度地激活，但是 mPFC 皮质的激活与否以及激活程度却会受到风险大小的影响。该研究同时发现在风险决策任务中个体多是一种奖励驱使的反应模式。

探究基因遗传与风险决策的关系在BART任务的脑成像研究中也很常见。Rao等人(2018)发现基因与环境都会对风险决策产生影响。在成年的年轻双胞胎群体中，风险决策行为以及脑区的激活均存在中度遗传的现象。尤其在主动风险决策的情境下，左侧脑岛(left insula)、右侧纹状体(right striatum)以及右上顶叶(right superior parietal lobule)的脑区激活与风险行为之间具有中度遗传的相关性。该研究为风险决策与脑区激活之间的遗传相关性提供了重要证据。与基因有关的研究还发现，基因会在大脑中产生不同功能的多巴胺能信号，而前额叶的功能、风险决策行为以及其他多巴胺能信号都会随着某个信号功能的变化而变化，证明多巴胺能有关的基因对于大脑功能的影响存在累积效应以及潜在的交互作用(Kohno et al., 2015)。上述研究反映出基因和遗传对风险决策在脑区激活上的影响深远，造成部分脑区的功能以及激活程度发生变化，使个体在风险决策中出现差异性的表现。环境对风险决策的影响，也通过BART任务及fMRI技术有所发现。研究者以宇航员为研究对象，结合BART任务和fMRI技术评估了头低位卧床模拟的微重力环境对于个体风险决策的影响及其神经基础。损失和奖励的结果对于头低位卧床时个体的vmPFC激活无显著差异，反映出个体在此环境下价值计算水平的下降。结果证明了在风险决策中vmPFC脑区对个体进行价值评估具有重要作用。头低位卧床导致决策中理应产生的vmPFC区域活动减弱情况出现得更少，可能会对个体的风险决策造成负面的影响(Rao et al., 2014)。

已有不少电生理层面的研究探讨了反馈对风险决策影响的神经机制，而在神经成像领域也有所发现。有研究通过使用BART任务、fMRI以及正电子发射体层摄影术(position emission tomography, PET)，探索了前一轮的反馈结果对BART任务中后续决策影响的神经机制。发现气球爆炸后，被试会减少下一轮中冒险的可能，且杏仁核以及海马体会对吹气的次数更加敏感，而在此过程中多巴胺神经传导会通过额叶以及纹状体形成的交互系统对决策行为进行调节(Kohno et al., 2013)。负反馈对任务中风险决策的影响也受到了很多关注，McCormick等人(2017)发现相对于正向的反馈结果而言，负反馈后大脑的mPFC区域在进行风险决策时的激活会减少。这表明个体的风险决策行为不仅受到奖赏机制的影响还受到负反馈对应惩罚机制的影响。

成瘾与风险决策是BART范式研究中的重要部分，在脑神经成像的研究中也受到重点关注。研究者发现自然主义的风险行为(如吸毒、酗酒、赌博等)与主动决策的BART任务具有相似性。借助BART任务对现实世界中的自然主义冒险行为进行模拟，通过fMRI成像发现了前扣带皮层(anterior cingulate cortex, ACC)以及右背外侧前额叶皮质(right dorsolateral prefrontal cortex, rDLPFC)的激活，同时发现腹内侧前额叶皮层(ventromedial prefrontal cortex,

vmPFC)的激活程度会随气球的膨胀而下降。这反映了随着风险的增加，人们将更加关注风险可能导致的损失而非潜在的回报(Schonberg et al., 2012)。同时在吸烟与不吸烟者的比较中发现，吸烟者在进行 BART 任务时会产生大脑 rDLPFC 以及腹外侧前额叶皮质(ventrolateral prefrontal cortex, VLPFC)更强的激活，为 rDLPFC 以及 VLPFC 参与到大脑的抑制控制机制中提供了证据。研究表明在风险决策中，年轻吸烟者的 PFC 与不吸烟者相比激活程度是不同的(Galván et al., 2013)。Wei 等人(2016)发现尼古丁检测量表(Test of Nicotine Dependence, FTND)的结果与 BART 任务中平均吹气泵数正相关，即风险决策的增加与尼古丁依赖性增强有关。这种依赖性会造成 dACC、脑岛以及丘脑之间连通回路的改变，导致该大脑环路的功能失调，这可能是尼古丁成瘾患者风险行为增加的重要原因。结果反映了风险决策受到以 dACC 为中心的大脑网络的调节，但与风险水平没有明显的相关性。有关于酒精依赖方面，研究发现患者中脑皮质边缘系统(mesocorticolimbic system)的灰质体积显著减少，奖赏网络在静息状态下的功能连接强度降低，导致了一些异常的冲动性行为。且左楔叶的灰质体积异常以及右楔叶、双侧背外侧前额叶皮质的脑区连接模式变化可以成功预测戒断后个体是否会出现酒精依赖症状的复发(Wang et al., 2018; Wang et al., 2016)。Hobkirk 等人(2019) 探究了可卡因成瘾对风险决策有关神经网络的影响。研究发现可卡因成瘾患者会表现出更多的风险行为，而这种行为与左侧认知控制有关脑区以及膝下前扣带回皮质(subgenual anterior cingulate cortex, sgACC)延伸奖赏网络之间的反向静息状态连通性有关。吸毒会造成奖赏以及执行回路网络发育的不平衡，患者的奖赏-执行-控制网络异常带来了更多的风险寻求行为。

与疾病和睡眠健康有关的研究发现，睡眠剥夺会影响风险决策的行为，借助 fMRI 和 BART 任务发现，睡眠剥夺增加了左侧下颞叶回(left inferior frontal gyrus, IFG)的激活，同时 BART 任务中的 cash-out 阶段观察到睡眠剥夺后腹侧纹状体、丘脑激活的增强以及气球爆破之后颞中回(middle temporal gyrus, MTG)的激活减弱，意味着个体冒险倾向的增加(Lei et al., 2016)。特质性焦虑与风险决策背后的神经基础也被进一步探索，发现风险行为与特质焦虑呈负相关，且特质性焦虑在海马和脑岛两脑区连接强度与风险决策关系中起到中介作用(Huo et al., 2020)，该结论与行为学层面的研究结果一致。Kohno 等人(2014)对比了甲基苯丙胺依赖患者与健康人在风险决策时脑激活的差异，发现在 BART 任务中患者的腹侧纹状体激活相对更强但是 rDLPFC 区域的激活相对更弱。同时患者的脑区连通回路也受到了影响，主要表现为更强的中脑与壳核、杏仁核以及海马体静息状态功能连接，导致患者的奖赏与认知控制脑区之间发展不平衡，他们会更倾向于奖励驱动的行为。帕金森患者中出现冲动控制失调(impulse control disorder, ICD)的原因也可通过 BART 任务进行探索。相关研究结果发现

出现 ICD 症状以及非 ICD 症状的患者在大脑激活上存在差异，ICD 症状的患者在静息状态以及任务态下纹状体激活减少，而非 ICD 患者并没有出现这样的情况。这将为未来不同症状帕金森患者的定向治疗提供参考(Rao et al., 2010)。

利用 BART 任务与 fMRI 技术，一些研究者还对于青少年这一重要群体的风险决策行为进行了探索。Telzer 等人(2013)发现青少年的风险行为与其认知控制和奖赏处理有关大脑区域得不协调发展相关，而这种不协调发展受到了家庭成长环境的影响。在面对同样的金钱奖赏刺激时，成长于富有责任感家庭中的青少年表现出腹侧纹状体的激活程度更低，且与行为抑制有关的 DLPFC 脑区激活程度更高，反映出这些注重责任感家庭中的青少年在现实中会表现出更少的风险行为以及更好的决策能力。Pei 等人(2020)从神经层面探索了同伴对青少年风险决策的影响。研究发现 ACC 脑区活动更强的被试更容易受到同伴的影响，而腹侧纹状体以及 ACC-脑岛之间的连通能够减少同伴在场对于青少年风险决策的影响。研究结果也反映出同伴会对青少年的风险处理脑区发展产生影响，特别是相关脑区中的神经通路。除使用 fMRI 技术外，一项近期研究通过结合磁共振弹性成像(magnetic resonance elastography, MRE)技术和体积测量发现伏隔核和前额叶皮层之间的粘弹性和体积差异与青少年风险行为的增加有关(McIlvain et al., 2020)。MRE 技术利用外部机械振动产生的振动波对内部的软组织及其弹性进行影像检查并量化组织的弹性程度，是一种非创伤性的成像技术，在疾病诊断方面有较为广泛的应用。除青少年被试群体外，还有研究借助 BART 任务探究衰老对风险行为影响的神经机制，通过对比 BART 任务中年轻人以及老年人在脑区激活上的差异，发现老年人进行决策时表现出 vmPFC 脑区活动减弱程度更小(Yu et al., 2016)。还有研究发现 vmPFC 与 dmPFC 之间的连接强度在年龄和风险行为之间起到中介作用(Yu et al., 2017)。

除了 fMRI 技术外，脑成像研究中功能性近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)也经常与 BART 任务结合使用。该技术的主要优势是成本较低且能够采集的样本量比 fMRI 技术更大(Cazzell et al., 2012)。使用该技术研究发现，主动风险决策时 PFC 脑区的激活更强，但是被动模式下相对较少。在性别差异方面，在主动性风险决策情境下受到负反馈时，女性会比男性表现出更显著的 DLPFC 脑区激活，但是在正反馈情况下男女差异较小(Cazzell et al., 2012)。老年群体在风险决策时的 PFC 脑区激活情况明显弱于年轻人，并且在老年群体中性别不同导致的脑区激活差异并不大(Li et al., 2016)。该技术也被用于疾病研究中，探究了美沙酮维持患者在治疗时是否服用可卡因对于风险决策的影响。结果发现相比于未服用的患者，服用可卡因的患者在风险决策任务中检测到 PFC 脑区的激活程度增强，反映出风险决策中 PFC 脑区活动的增强与持续使用可卡因有关(Huhn et al., 2019)。

再比如目前弥散张量成像技术(Diffusion Tensor Imaging; DTI)也在 BART 任务研究中被使用，帮助更系统化地研究风险行为对应的大脑结构基础，为理解大脑结构与认知行为之间的关系提供参考(D'Alessandro et al., 2020)。已有研究通过建立相关结构模型，发现白质纤维的连通性可以帮助巩固和处理大脑皮层与纹状体回路之间的信号传递，而前额叶、脑岛、中脑和纹状体间的白质纤维连接与风险寻求行为呈正相关(Kohno et al., 2017)。

综上所述，已有的 BART 任务研究中采用了 ERP、fMRI、PET、fNIRS 等多种不同的认知神经科学技术并已经获得许多有意义的研究结果。研究发现，BART 任务中的风险决策与腹侧纹状体、前扣带皮层、脑岛、中脑、及背外侧前额叶等多个不同脑区的激活有关，表明该范式是一项涉及奖赏、情绪、学习以及价值评估等在内的复杂决策任务。此外，脑区间的连通性以及形成的网络回路激活情况也是 BART 任务中个体表现的重要反映。

5 总结与展望

BART 任务是奖赏以及认知控制网络相关的动态风险决策过程。与其他常见的风险决策任务相比，在一个试次中涉及多次吹气决策，其盈利概率以及风险概率也会随着被试选择的不同而发生变化，与现实中变化莫测的风险情境非常类似。相比于其他任务固定风险概率设定形式(如在赌博任务中较为固定的输赢概率设定)，BART 任务更具生态性以及研究的有效性，更有助于成瘾、精神病理以及不良行为的预测。在与 IGT 任务的对比研究中发现，在 BART 任务中被试更关注奖赏的变化，而在 IGT 任务中则更关注奖赏的得失情况。就学习过程而言，IGT 在不断地学习中会产生一定经验(如被试发现选择 C、D 纸牌更加有利)，可能会对后续的行为造成影响，而 BART 任务中由于风险概率不同，受前次实验结果影响较小(Herzberg et al., 2018)。总结而言，BART 任务测量的主要是以奖赏以及情绪为导向的风险决策行为，受认知控制以及注意力有关脑区的调控，可以作为风险决策中冒险倾向的一种行为测量方式，具有一定的测量优势以及重要的研究价值。

相比于传统的量表测量法以及部分范式而言，BART 任务的出现扩展了风险决策研究的深度和广度，近年来被广泛运用。为了适应研究的需要，BART 任务被改编成适应于不同年龄段、不同被试群体以及不同决策过程的变体。随着 BART 任务的兴起，其应用范围不断扩大，并迁移到睡眠、健康发展以及精神病理等相关的研究中。 BART 任务具有简易以及可持续操作的特征，这也使其成为在认知神经层面研究风险决策行为的重要测量工具。通过研究发现，风险决策与腹侧纹状体、ACC、脑岛、中脑、PFC 等多个脑区的活动有关。一

些不健康的生活习惯(如睡眠不足)、成瘾以及物质滥用会造成风险决策时脑区以及神经回路的激活异常，从而导致异常的风险决策行为产生。而生活环境以及年龄也会造成个体风险决策有关脑区的发育受到影响。研究发现，青少年时期的不良生活环境会造成大脑的奖赏与认知系统发育不平衡，从而导致异常的风险决策行为产生，这种影响是深远且很难改变的，甚至具有一定的可遗传性。

虽然 BART 任务运用的研究范围已经比较广泛，但是纵观相关研究结果，该实验范式还具有如下的局限性及亟待改进之处：①BART 任务涉及的风险决策过程较为复杂，领域内研究者在其属于风险决策、不确定性决策亦或是同时涉及两种决策这一问题上仍未达成共识。②BART 任务中的风险决策概率是未知的，被试需要通过前几个试次的探索建立对任务中风险概率的预判，而这种预判往往是片面的且很可能对后续被试的风险决策行为造成影响，被试或因前几个试次中糟糕的表现而减少后续的冒险行为，导致数据的可靠性下降。③虽然 BART 任务已被证实与风险决策有关自陈量表的测量结果显著相关，但也有部分研究对此持怀疑态度(e.g. Frey et al., 2017)。④BART 任务具有模拟现实世界风险的真实性，一直以来也被作为风险倾向的测量工具，但是随着现实世界风险情境的复杂化，BART 任务及其大量衍生的变体也不能完全覆盖很多常见的风险研究情境，其结果仍与现实世界的复杂风险决策存在一定的出入。⑤目前已有研究验证了 BART 任务的信效度，但仍为数不多(特别是在神经领域)，需要更多的研究就不同情境下该范式的可靠性进行验证。⑥虽然 BART 任务在神经层面的研究上已获得一定的进展，但是由于获取数据的困难，其样本量相比行为层面仍较为缺乏，低样本量可能带来假阳性结果的产生，因此需要在扩大相关数据库样本量上做出更多的努力。⑦对于 BART 任务适用的范围，目前研究使用“现实风险情境”来描述，但实际现实中风险情境千变万化，也已有研究证明 BART 任务在部分研究中的有效性以及准确性不如其他范式(e.g. Buelow & Barnhart, 2017; Frey et al., 2017)，未来应就其适用的风险情境进行更加具体细化的阐述。

因此，基于上述 BART 范式存在的问题，未来研究可以考虑集中在以下几个方面进一步开展：

一、目前 BART 实验范式与其他风险决策实验范式的系统性对比研究还比较缺乏，可以通过扩展相关研究，确定 BART 范式测量结果对风险决策中各类行为解释上的贡献，使 BART 任务能够更好地适应不同风险决策行为测量以及解释的需要。

二、推进 BART 实验范式的进一步演变，扩大并验证其适用范围，尤其是针对更细化的风险决策情境，提升该研究范式的生态性。例如像 BART 任务改编的 BAIT 任务一样，考

虑现实生活中更加具体的风险情境并做出相应的实验方案调整。

三、验证并完善 BART 实验范式的信效度。需要从不同角度、不同群体以及不同方式上进一步验证和提升 BART 任务的信效度，以方便相关领域的研究者能够更好地运用该范式。例如，对 BART-Y, BAIT 等各种 BART 变体实验范式，需要对其信效度进行验证后才能推广使用。针对不同的人群，如年轻人、老年人以及不同类型的患者，BART 范式在被试群体变化时测量信效度是否能有效保障，也需要进一步的研究和验证。此外，可以采用线上测量的形式并结合使用 BART 任务不同的变体，使被试能够在不同的工作情境和生活场景中接受测量而不是单单只停留在实验室内。这样不仅可以消除实验室研究中的一些局限性，还可以在不同的实验场景下进一步验证 BART 任务的生态性和稳定性，有助于 BART 任务在实际管理和运行中的推广。

四、关注 BART 实验范式在老龄化决策领域的应用。步入老年后，随着年龄的增长以及一系列病症的出现，个体的决策行为会受到很大影响，但有一些决策行为变化产生的原因以及潜在影响还未得到明确的结论。老龄化是个体必须要经历的过程，相关研究对社会以及个人健康发展都具有重要的意义。

五、建立 BART 实验范式相关的行为及脑影像数据库。目前 BART 任务的相关研究还停留在个体化比较分散的状态，相关数据的收集需要耗费大量的人力物力，特别是使用 fMRI 等昂贵技术获取与疾病相关的大样本数据仍然比较困难。未来可以建立一个基于 BART 任务范式的大型风险决策研究数据库，用于共享不同领域及层面的研究数据和结果，有助于建立更精准的风险决策预测模型，从行为、认知、神经以及基因等多层面推进我们对风险决策的深入理解。

参考文献

刘晓婷, 张丽锦, 张宁. (2019). 睡眠质量对冒险行为影响的证据及解析. *心理科学进展*, *27*(11), 1875–1886.

田录梅, 袁竞驰, 李永梅. (2017). 同伴在场和自尊水平对青少年冒险行为的影响: 来自 ERPs 的证据. *心理学报*, *50*(1), 47–57.

徐四华, 方卓, 饶恒毅. (2013). 真实和虚拟金钱奖赏影响风险决策行为. *心理学报*, *45*(8), 874–886.

Aklin, W. M., Lejuez, C. W., Zvolensky, M. J., Kahler, C. W., &Gwadz, M. (2005). Evaluation of behavioral measures of risk taking propensity with inner city adolescents. *Behaviour Research and Therapy*, *43*(2), 215–228.

Anokhin, A. P., Golosheykin, S., Grant, J., & Heath, A. C. (2009). Heritability of risk-taking in adolescence: a

longitudinal twin study. *Twin Research and Human Genetics*, *12*(4), 366–371.

Ba, Y., Zhang, W., Peng, Q., Salvendy, G., &Crundall, D. (2016). Risk-taking on the road and in the mind: behavioural and neural patterns of decision making between risky and safe drivers. *Ergonomics, 59*(1), 27–38.

Banducci, A. N., Felton, J. W., Dahne, J., Ninnemann, A., &Lejuez, C. W. (2015). Maternal risk taking on the balloon analogue risk task as a prospective predictor of youth alcohol use escalation. *Addictive Behaviors*, *49*, 40–45.

Bechara, A., Damasio, A. R., Damasio, H., & Anderson, S. W. (1994). Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex. *Cognition*, *50*(1–3), 7–15.

Buelow, M. T., & Barnhart, W. R. (2017). The Influence of Math Anxiety, Math Performance, Worry, and Test Anxiety on the Iowa Gambling Task and Balloon Analogue Risk Task. *Assessment*, *24*(1), 127–137.

Buelow, M. T., & Blaine, A. L. (2015). The assessment of risky decision making: A factor analysis of performance on the Iowa Gambling Task, Balloon Analogue Risk Task, and Columbia Card Task. *Psychological Assessment*, *27*(3), 777.

Canning, J. R., Schallert, M. R., & Larimer, M. E. (2021). A Systematic Review of the Balloon Analogue Risk Task (BART) in Alcohol Research. *Alcohol and Alcoholism*. Advance online publication. https://doi.org/10.1093/alcalc/agab004

Cavanagh, J. F., Neville, D., Cohen, M. X., Van de Vijver, I., Harsay, H., Watson, P., . . . Ridderinkhof, K. R. (2012). Individual Differences in Risky Decision-Making Among Seniors Reflect Increased Reward Sensitivity. *Frontiers in Neuroscience, 6*,111.

Cazzell, M., Li, L., Lin, Z. J., Patel, S. J., & Liu, H. (2012). Comparison of neural correlates of risk decision making between genders: an exploratory fNIRS study of the Balloon Analogue Risk Task (BART). *Neuroimage*, *62*(3), 1896–1911.

Ciccarelli, M., Griffiths, M. D., Cosenza, M., Nigro, G., &D'Olimpio, F. (2020). Disordered gambling and attentional bias: The mediating role of risk-taking. *Journal of Affective Disorders*, *272*, 496–500.

Crişan, L. G., Pană, S., Vulturar, R., Heilman, R. M., Szekely, R., Drugă, B., ... &Miu, A. C. (2009). Genetic contributions of the serotonin transporter to social learning of fear and economic decision making. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *4*(4), 399–408.

D’Alessandro, M., Gallitto, G., Greco, A., & Lombardi, L. (2020). A joint modelling approach to analyze risky decisions by means of diffusion tensor imaging and behavioural data. *Brain Sciences*, *10*(3), 138.

Deakin, J., Aitken, M., Robbins, T., & Sahakian, B. J. (2004). Risk taking during decision-making in normal volunteers changes with age. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, *10*(4), 590.

Deuter, C. E., Wingenfeld, K., Schultebraucks, K., Hellmann-Regen, J., Piber, D., &Otte, C. (2017). Effects of mineralocorticoid-receptor stimulation on risk taking behavior in young healthy men and women. *Psychoneuroendocrinology, 75*, 132–140.

Duell, N., Steinberg, L., Icenogle, G., Chein, J., Chaudhary, N., Di Giunta, L., ... & Chang, L. (2018). Age patterns in risk taking across the world. *Journal of Youth and Adolescence, 47*(5), 1052–1072.

Essex, B. G., Lejuez, C. W., Qian, R. Y., Bernstein, K., &Zald, D. H. (2011). The Balloon Analog Insurance Task (BAIT): a behavioral measure of protective risk management. *PLoS One, 6*(6), e21448.

Fernie, G., Cole, J. C., Goudie, A. J., & Field, M. (2010). Risk-taking but not response inhibition or delay discounting predict alcohol consumption in social drinkers. *Drug and Alcohol Dependence, 112*(1–2), 54–61.

Frey, R., Pedroni, A., Mata, R., Rieskamp, J., &Hertwig, R. (2017). Risk preference shares the psychometric structure of major psychological traits. *Science Advances, 3*(10), e1701381.

Galván, A., Schonberg, T., Mumford, J., Kohno, M., Poldrack, R. A., & London, E. D. (2013). Greater risk sensitivity of dorsolateral prefrontal cortex in young smokers than in nonsmokers. *Psychopharmacology, 229*(2), 345–355.

Giustiniani, J., Joucla, C., Bennabi, D., Nicolier, M., Chabin, T., Masse, C., ... & Gabriel, D. (2019). Behavioral and electrophysiological arguments in favor of a relationship between impulsivity, risk-taking, and success on the Iowa gambling task. *Brain Sciences, 9*(10), 248.

Gu, R., Zhang, D., Luo, Y., Wang, H., &Broster, L. S. (2018). Predicting risk decisions in a modified Balloon Analogue Risk Task: Conventional and single-trial ERP analyses. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 18*(1), 99–116.

Guo, H., Zhang, Z., Da, S., Sheng, X., & Zhang, X. (2018). High-definition transcranial direct current stimulation (HD-tDCS) of left dorsolateral prefrontal cortex affects performance in Balloon Analogue Risk Task (BART). *Brain and Behavior, 8*(2), e00884.

Herzberg, M. P., Hodel, A. S., Cowell, R. A., Hunt, R. H., Gunnar, M. R., & Thomas, K. M. (2018). Risk taking, decision-making, and brain volume in youth adopted internationally from institutional care. *Neuropsychologia, 119*, 262–270.

Hill, E. M., & Chow, K. (2002). Life-history theory and risky drinking. *Addiction, 97*(4), 401–413.

Hobkirk, A. L., Bell, R. P., Utevsky, A. V., Huettel, S., & Meade, C. S. (2019). Reward and executive control network resting-state functional connectivity is associated with impulsivity during reward-based decision making for cocaine users. *Drug and Alcohol Dependence, 194*, 32–39.

Huhn, A. S., Brooner, R. K., Sweeney, M. M., Yip, S. W., Ayaz, H., & Dunn, K. E. (2019). Increased neural activity in the right dorsolateral prefrontal cortex during a risky decision-making task is associated with cocaine use in methadone-maintained patients. *Drug and Alcohol Dependence, 205*, 107650.

Hunt, M. K., Hopko, D. R., Bare, R., Lejuez, C. W., & Robinson, E. V. (2005). Construct validity of the Balloon Analog Risk Task (BART): associations with psychopathy and impulsivity. *Assessment, 12*(4), 416–428.

Huo, H., Zhang, R., Seger, C. A., Feng, T., & Chen, Q. (2020). The effect of trait anxiety on risk-taking: Functional coupling between right hippocampus and left insula. *Psychophysiology, 57*(10), e13629.

Hüpen, P., Habel, U., Schneider, F., Kable, J. W., &Wagels, L. (2019). Impulsivity Moderates Skin Conductance Activity During Decision Making in a Modified Version of the Balloon Analog Risk Task. *Frontiers in Neuroscience, 13*, 345.

Jentsch, J. D., Woods, J. A., Groman, S. M., &Seu, E. (2010). Behavioral characteristics and neural mechanisms mediating performance in a rodent version of the Balloon Analog Risk Task. *Neuropsychopharmacology, 35*(8), 1797–1806.

Karakowsky, L., &Elangovan, A. R. (2001). Risky decision making in mixed-gender teams: Whose risk tolerance matters? *Small Group Research, 32*(1), 94–111.

Kessler, L., Hewig, J., Weichold, K., Silbereisen, R. K., &Miltner, W. H. (2017). Feedback negativity and decision-making behavior in the Balloon Analogue Risk Task (BART) in adolescents is modulated by peer presence. *Psychophysiology, 54*(2), 260–269.

Killgore, W. D. S., Kamimori, G. H., &Balkin, T. J. (2011). Caffeine protects against increased risk-taking propensity during severe sleep deprivation. *Journal of Sleep Research, 20*(3), 395–403.

Kim, M., Kim, S., Lee, K. U., &Jeong, B. (2020). Pessimistically biased perception in panic disorder during risk learning. *Depression and Anxiety, 37*(7), 609–619.

Kohno, M., Ghahremani, D. G., Morales, A. M., Robertson, C. L., Ishibashi, K., Morgan, A. T., . . . London, E. D. (2013). Risk-Taking Behavior: Dopamine D2/D3 Receptors, Feedback, and Frontolimbic Activity. *Cerebral Cortex, 25*(1), 236–245.

Kohno, M., Morales, A. M., Ghahremani, D. G., Hellemann, G., & London, E. D. (2014). Risky decision making, prefrontal cortex, and mesocorticolimbic functional connectivity in methamphetamine dependence.

JAMA Psychiatry, 71(7), 812–820.

Kohno, M., Morales, A. M., Guttman, Z., & London, E. D. (2017). A neural network that links brain function, white-matter structure and risky behavior. *Neuroimage, 149*, 15–22.

Kohno, M., Nurmi, E. L., Laughlin, C. P., Morales, A. M., Gail, E. H., Hellemann, G. S., & London, E. D. (2015). Functional Genetic Variation in Dopamine Signaling Moderates Prefrontal Cortical Activity During Risky Decision Making. *Neuropsychopharmacology, 41*(3), 695–703.

Korucuoglu, O., Harms, M. P., Astafiev, S. V., Kennedy, J. T., Golosheykin, S., Barch, D. M., &Anokhin, A. P. (2020). Test-retest reliability of fMRI-measured brain activity during decision making under risk. *Neuroimage, 214*, 116759.

Lei, Y., Wang, L., Chen, P., Li, Y., Han, W., Ge, M., . . . Yang, Z. (2016). Neural correlates of increased risk-taking propensity in sleep-deprived people along with a changing risk level. *Brain Imaging and Behavior, 11*(6), 1910–1921.

Leigh, B. C. (1999). Peril, chance, adventure: concepts of risk, alcohol use and risky behavior in young adults. *Addiction, 94*(3), 371–383.

Lejuez, C. W., Aklin, W., Daughters, S., Zvolensky, M., Kahler, C., &Gwadz, M. (2007). Reliability and validity of the youth version of the balloon analogue risk task (BART–Y) in the assessment of risk-taking behavior among inner-city adolescents. *Journal of Clinical Child and Adolescent Psychology, 36*(1), 106–111.

Lejuez, C. W., Aklin, W. M., Jones, H. A., Richards, J. B., Strong, D. R., Kahler, C. W., & Read, J. P. (2003). The balloon analogue risk task (BART) differentiates smokers and nonsmokers. *Experimental and Clinical Psychopharmacology, 11*(1), 26–33.

Lejuez, C. W., Aklin, W. M., Zvolensky, M. J., &Pedulla, C. M. (2003). Evaluation of the Balloon Analogue Risk Task (BART) as a predictor of adolescent real-world risk-taking behaviours. *Journal of Adolescence, 26*(4), 475–479.

Lejuez, C. W., Read, J. P., Kahler, C. W., Richards, J. B., Ramsey, S. E., Stuart, G. L., . . . Brown, R. A. (2002). Evaluation of a behavioral measure of risk taking: The Balloon Analogue Risk Task (BART). *Journal of Experimental Psychology: Applied, 8*(2), 75–84.

Li, L., Cazzell, M., Zeng, L., & Liu, H. (2016). Are there gender differences in young vs. aging brains under risk decision-making? An optical brain imaging study. *Brain Imaging and Behavior, 11*(4), 1085–1098.

Li, M., Mai, Z., Yang, J., Zhang, B., & Ma, N. (2020). Ideal Time of Day for Risky Decision Making: Evidence from the Balloon Analogue Risk Task. *Nature and Science of Sleep, 12*, 477.

Li, X., Pan, Y., Fang, Z., Lei, H., Zhang, X., Shi, H., . . . Rao, H. (2020). Test-retest reliability of brain responses to risk-taking during the balloon analogue risk task. *Neuroimage, 209*, 116495.

Lighthall, N. R., Mather, M., &Gorlick, M. A. (2009). Acute stress increases sex differences in risk seeking in the balloon analogue risk task. *PLoS One*, *4*(7), e6002.

Liu, Z., Liu, T., & Mu, S. (2021). Gender differences in the effects of competition and cooperation on risk-taking under ambiguity. *PsyCh Journal*, *10*(3), 374–383.

Mason, A. E., Schleicher, S., Coccia, M., Epel, E. S., &Aschbacher, K. (2018). Chronic stress and impulsive risk-taking predict increases in visceral fat over 18 months. *Obesity*, *26*(5), 869–876.

McCormick, E. M., &Telzer, E. H. (2017). Failure to retreat: Blunted sensitivity to negative feedback supports risky behavior in adolescents. *NeuroImage*, *147*, 381–389.

McIlvain, G., Clements, R. G., Magoon, E. M., Spielberg, J. M., Telzer, E. H., & Johnson, C. L. (2020). Viscoelasticity of reward and control systems in adolescent risk taking. *Neuroimage, 215*, 116850.

Mehta, P. H., Welker, K. M., Zilioli, S., &Carré, J. M. (2015). Testosterone and cortisol jointly modulate risk-taking. *Psychoneuroendocrinology, 56*, 88–99.

Park, H., Yang, J., Vassileva, J., &Ahn, W. Y. (2021). Development of a novel computational model for the Balloon Analogue Risk Task: The exponential-weight mean–variance model. *Journal of Mathematical Psychology, 102*, 102532.

Pei, R., Lauharatanahirun, N., Cascio, C. N., O'Donnell, M. B., Shope, J. T., Simons-Morton, B. G., ... & Falk, E. B. (2020). Neural processes during adolescent risky decision making are associated with conformity to peer influence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *44*, 100794.

Pleskac, T. J. (2008). Decision making and learning while taking sequential risks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 34*(1), 167.

Pleskac, T. J., Wallsten, T. S., Wang, P., &Lejuez, C. W. (2008). Development of an automatic response mode to improve the clinical utility of sequential risk-taking tasks. *Experimental and Clinical Psychopharmacology, 16*(6), 555.

Rao, H., Korczykowski, M., Pluta, J., Hoang, A., &Detre, J. A. (2008). Neural correlates of voluntary and involuntary risk taking in the human brain: an fMRI Study of the Balloon Analog Risk Task (BART). *Neuroimage, 42*(2), 902–910.

Rao, H., Mamikonyan, E., Detre, J. A., Siderowf, A. D., Stern, M. B., Potenza, M. N., & Weintraub, D. (2010). Decreased ventral striatal activity with impulse control disorders in Parkinson's disease. *Movement*

Disorders, 25(11), 1660–1669.

Rao, L. L., Zhou, Y., Liang, Z. Y., Rao, H., Zheng, R., Sun, Y., ... & Li, S. (2014). Decreasing ventromedial prefrontal cortex deactivation in risky decision making after simulated microgravity: effects of −6° head-down tilt bed rest. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *8*, 187.

Rao, L. L., Zhou, Y., Zheng, D., Yang, L. Q., & Li, S. (2018). Genetic contribution to variation in risk taking: a functional MRI twin study of the balloon analogue risk task. *Psychological Science*, *29*(10), 1679–1691.

Rogers, R. D., Everitt, B. J., Baldacchino, A., Blackshaw, A. J., Swainson, R., Wynne, K., ... & Robbins, T. W. (1999). Dissociable deficits in the decision-making cognition of chronic amphetamine abusers, opiate abusers, patients with focal damage to prefrontal cortex, and tryptophan-depleted normal volunteers: evidence for monoaminergic mechanisms. *Neuropsychopharmacology, 20*(4), 322–339.

Schmidt, B., Kessler, L., Holroyd, C. B., &Miltner, W. H. R. (2019). Wearing a bike helmet leads to less cognitive control, revealed by lower frontal midline theta power and risk indifference. *Psychophysiology, 56*(12), e13458.

Schonberg, T., Fox, C. R., Mumford, J. A., Congdon, E., Trepel, C., &Poldrack, R. A. (2012). Decreasing Ventromedial Prefrontal Cortex Activity During Sequential Risk-Taking: An fMRI Investigation of the Balloon Analog Risk Task. *Frontiers in Neuroscience, 6*, 80.

Sehrig, S., Weiss, A., Miller, G. A., &Rockstroh, B. (2019). Decision- and feedback-related brain potentials reveal risk processing mechanisms in patients with alcohol use disorder. *Psychophysiology, 56*(12), e13450.

Sela, T., Kilim, A., &Lavidor, M. (2012). Transcranial alternating current stimulation increases risk-taking behavior in the balloon analog risk task. *Frontiers in Neuroscience*, *6*, 22.

Skeel, R. L., Neudecker, J., Pilarski, C., &Pytlak, K. (2007). The utility of personality variables and behaviorally-based measures in the prediction of risk-taking behavior. *Personality and Individual Differences*, *43*(1), 203–214.

Slovic, P. (1964). Assessment of risk taking behavior. *Psychological Bulletin, 61*(3), 220.

Telzer, E. H., Fuligni, A. J., Lieberman, M. D., &Galván, A. (2013). Meaningful family relationships: neurocognitive buffers of adolescent risk taking. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *25*(3), 374–387.

Upton, D. J., Bishara, A. J., Ahn, W. Y., & Stout, J. C. (2011). Propensity for risk taking and trait impulsivity in the Iowa Gambling Task. *Personality and Individual Differences, 50*(4), 492–495.

van Ravenzwaaij, D., Dutilh, G., &Wagenmakers, E.-J. (2011). Cognitive model decomposition of the BART: Assessment and application. *Journal of Mathematical Psychology, 55*(1), 94–105.

Wagels, L., Votinov, M., Radke, S., Clemens, B., Montag, C., Jung, S., &Habel, U. (2017). Blunted insula activation reflects increased risk and reward seeking as an interaction of testosterone administration and the MAOA polymorphism. *Human Brain Mapping, 38*(9), 4574–4593.

Wallsten, T. S., Pleskac, T. J., &Lejuez, C. W. (2005). Modeling behavior in a clinically diagnostic sequential risk-taking task. *Psychological Review, 112*(4), 862.

Wang, J., Fan, Y., Dong, Y., Ma, M., Dong, Y., Niu, Y., . . . Cui, C. (2018). Combining gray matter volume in the cuneus and the cuneus-prefrontal connectivity may predict early relapse in abstinent alcohol-dependent patients. *PLoS One*, *13*(5), e0196860.

Wang, J., Fan, Y., Dong, Y., Ma, M., Ma, Y., Dong, Y., . . . Cui, C. (2016). Alterations in Brain Structure and Functional Connectivity in Alcohol Dependent Patients and Possible Association with Impulsivity. *PLoS One, 11*(8), e0161956.

Weafer, J., Baggott, M. J., & de Wit, H. (2013). Test–retest reliability of behavioral measures of impulsive choice, impulsive action, and inattention. *Experimental and Clinical Psychopharmacology, 21*(6), 475.

Wei, Z., Yang, N., Liu, Y., Yang, L., Wang, Y., Han, L., . . . Zhang, X. (2016). Resting-state functional connectivity between the dorsal anterior cingulate cortex and thalamus is associated with risky decision-making in nicotine addicts. *Scientific Reports, 6*(1), 1–9.

Weidlich, V. A. (2020). Personality and Genetics Correlations to Risk-Taking Using Quantum Decision Theory in Balloon Analogue Risk Tasks. *Cureus*, *12*(8), e9923.

White, T. L., Lejuez, C. W., & de Wit, H. (2008). Test-retest characteristics of the Balloon Analogue Risk Task (BART). *Experimental and Clinical Psychopharmacology*, *16*(6), 565.

Xu, S., Fang, Z., & Rao, H. (2013). Real or hypothetical monetary rewards modulates risk taking behavior. *Acta Psychologica Sinica, 45*(8), 874–886.

Xu, S., Korczykowski, M., Zhu, S., & Rao, H. (2013). Assessment of risk-taking and impulsive behaviors: A comparison between three tasks. *Social Behavior and Personality*, *41*(3), 477.

Xu, S., Liu, Q., & Wang, C. (2021). Self-reported Daily Sleep Quality Modulates the Impact of the Framing Effect on Outcome Evaluation in Decision-Making Under Uncertainty: An ERP Study. *Neuropsychologia*, *157,* 107864.

Xu, S., Luo, L., Xiao, Z., Zhao, K., Wang, H., Wang, C., & Rao, H. (2019). High sensation seeking is associated with behavioral and neural insensitivity to increased negative outcomes during decision-making under uncertainty. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *19*(6), 1352–1363.

Xu, S., Pan, Y., Qu, Z., Fang, Z., Yang, Z., Yang, F., . . . Rao, H. (2018). Differential effects of real versus hypothetical monetary reward magnitude on risk-taking behavior and brain activity. *Scientific Reports, 8*(1), 1–9.

Xu, S., Xiao, Z., & Rao, H. (2019). Hypothetical Versus Real Monetary Reward Decrease the Behavioral and Affective Effects in the Balloon Analogue Risk Task. *Experimental Psychology, 66*, 221–230.

Yang, X., Gao, M., Shi, J., Ye, H., & Chen, S. (2017). Modulating the activity of the DLPFC and OFC has distinct effects on risk and ambiguity decision-making: A tDCS study. *Frontiers in Psychology,* 8, 1417.

Yu, J., Li, R., Guo, Y., Fang, F., Duan, S., & Lei, X. (2017). Resting-state functional connectivity within medial prefrontal cortex mediates age differences in risk taking. *Developmental Neuropsychology, 42*(3), 187–197.

Yu, J., Mamerow, L., Lei, X., Fang, L., & Mata, R. (2016). Altered value coding in the ventromedial prefrontal cortex in healthy older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience, 8*, 210.

Zhang, D., & Gu, R. (2018). Behavioral preference in sequential decision-making and its association with anxiety. *Human Brain Mapping, 39*(6), 2482–2499.

Zhou, R., Myung, J. I., & Pitt, M. A. (2021). The scaled target learning model: Revisiting learning in the balloon analogue risk task. *Cognitive Psychology, 128,* 101407.

Risk-taking research based on the Balloon Analog Risk Task (BART)

DENG Yao[1,2]; WANG Mengmeng[1,2]; RAO Hengyi[1,2]

([1]*School of Business and Management, Shanghai International Studies University, Shanghai 201620, China*)

([2]*Key Laboratory of Applied Brain and Cognitive Sciences, Shanghai International Studies University, Shanghai 201620, China*)

Abstract: The Balloon Analog Risk Task (BART) can well simulate real world risk-taking situations in the laboratory environment. Due to its high ecological validity, reliability and stability, the BART paradigm has become one of the most widely used paradigms for risky decision-making research. Recently, researchers have developed multiple variants of the BART paradigm and explored risk-taking behavior and neural correlates in developmental, health, and pathological fields. Risk-taking in the BART is associated with activations in multiple brain regions including the ventral striatum, anterior cingulate cortex (ACC), insula, midbrain and dorsolateral prefrontal cortex. Future studies need to further improve the reliability and stability of the BART for cognitive neuroscience research and expand its application scope.

Key words: The Balloon Analog Risk Task (BART), risk decision-making, cognitive neural mechanism